

古尔班通古特沙漠及周边区域全新世环境
演变研究进展徐宇杰^{1,2}, 刘冰¹, 孙爱军^{1,2,3}, 汪克奇^{1,2}, 李冬雪^{1,2}, 赵晖¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院/中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 兰州大学资源环境学院/西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 古尔班通古特沙漠作为中国最大的固定、半固定沙漠, 是中国境内受西风环流影响最为明显的沙漠之一, 其全新世环境演变过程及其对全球气候变化的响应和反馈, 对理解该区现代地表过程与未来环境演变趋势具有重要的科学意义。古尔班通古特沙漠及周边区域全新世环境演变研究的结果明显不同, 存在中晚全新世和中全新世降水/湿度变化最优期的分歧, 成因机制存在季风深入内陆和西风总体控制的争议。以目前区域已发表的多载体记录为基础, 通过降维和集成分析重建了该区全新世气候/湿度变化背景, 梳理区域风沙沉积地层年代学时空分布, 集成了该区全新世风沙活动历史, 进而探讨区域风沙活动与湿度变化的耦合关系。结果表明该区早中全新世(12~6 ka)气候干旱, 风沙活动强烈; 中晚全新世以来湿度逐渐增加、风沙活动逐渐减弱。通过区域及半球尺度的对比分析, 发现该区环境演变过程主要受西风环流的控制。

关键词: 全新世; 湿度变化; 风沙活动; 成因机制; 古尔班通古特沙漠

文章编号: 1000-6060(2023)04-0550-13(0550~0562)

从大尺度大气环流系统的角度来讲, 中纬度亚洲大陆可大致分为受亚洲季风控制湿润的亚洲季风区域(以我国东部地区为代表)和常年受到西风环流控制的亚洲中部干旱区域(以中亚、中国内陆干旱区为代表), 即“季风亚洲”和“西风亚洲”^[1-3]。两者大致边界介于大兴安岭—河套地区—腾格里沙漠东南缘至青藏高原东北缘向高原中部西延, 大致与我国干旱-半干旱区分界线一致^[4-5]。古尔班通古特沙漠位于中国新疆北部, 是中国境内受西风环流影响最为明显的地区之一。尽管基于区域典型风成沉积、河湖相—风成沉积序列和湖泊沉积的古气候重建结果颇多, 但也存在显著的分歧: 如陈惠中等^[6]通过位于古尔班通古特沙漠西南隅的莫索湾全新世地层剖面的分析, 发现全新世以来区域气候演化呈现温湿(凉湿)、冷干波动的类“季风模式”,

认为该区7~5 ka期间的湿度变化主要受亚洲季风强度变化的控制; Li等^[7]对沙漠东南部梧桐沟纵向沙垄和垄间地沉积剖面的分析认为古尔班通古特沙漠全新世以来的演化主要受西风的控制, 8.5~3.6 ka为全新世湿度最优期, 这与Chen等^[3]所提出的亚洲中部干旱区气候模式相类似; Long等^[8]对天山巴音布鲁克盆地内沙丘演化的推断, 则认为全新世以来区域环境演变总体上遵循全新世早期干旱, 中晚全新世湿度逐渐增加的类“西风模式”, 与Chen等^[2]提出的西风核心区湿度演化模式相一致。这些分歧的实质在于: (1) 认为西北干旱区湿度变化主要受亚洲夏季风强度变化的影响, 湿度增加主要为亚洲夏季风深入内陆所引起; (2) 认为该研究区的湿度演化主要受控于西风强度的变化, 亚洲季风特别是水汽对区域湿度变化过程的影响微乎其微。有鉴

收稿日期: 2022-06-22; 修订日期: 2022-07-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0606400); 国家自然科学基金(41977393)资助

作者简介: 徐宇杰(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事干旱区环境演变等方面的研究。E-mail: xuyujie@nieer.ac.cn

通讯作者: 刘冰(1985-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事干旱区环境演变与气候变化等方面的研究。E-mail: liubing2014@lzb.ac.cn

于此,我们对古尔班通古特沙漠及其周边区域已发表的20个不同沉积序列重建的湿度变化进行集成分析以建立区域气候变化的背景。其次,对区域内19个具有风沙活动记录的沉积剖面进行汇总,集成区域全新世风沙活动框架过程;并将其与重建的气候背景进行对比分析,通过湿度变化-风沙活动的相互关系来进一步探讨区域环境演变,特别是风沙活动过程如何响应于气候变化模式。

1 研究区概况

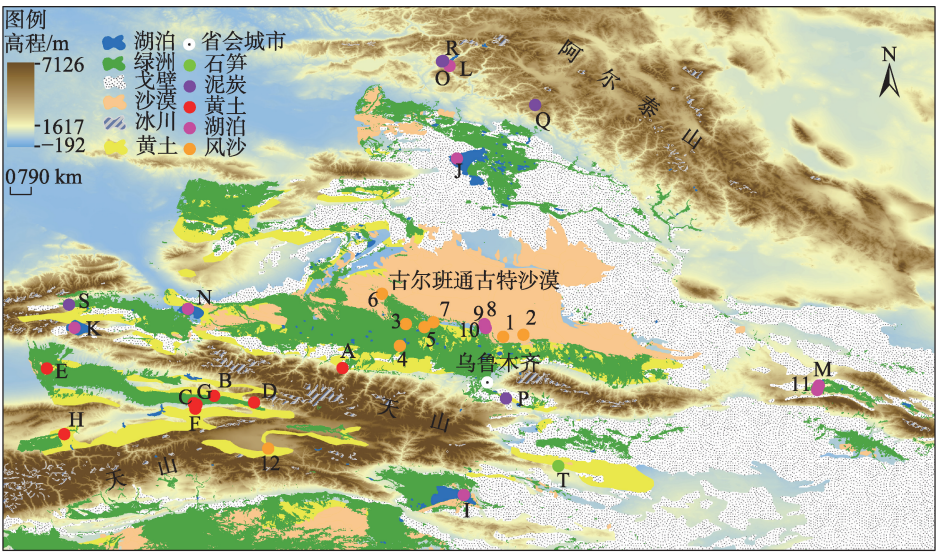
古尔班通古特沙漠(44°11'~46°20'N,84°31'~90°00'E)位于新疆北部准噶尔盆地腹地,面积 $5.113\times 10^4\text{ km}^2$,是我国最大的固定、半固定沙漠^[9]。沙漠四周高山环绕,地形闭塞,位于阿尔泰山和天山之间,西侧为准噶尔西部山地,东侧为北塔山。地质构造上,古尔班通古特沙漠是在第四系冲积平原上发展起来的,其时间可能早于中更新世^[10]。沙漠周边地区年均气温5~7℃,年降水量70~150 mm,平均年蒸发量1591.23~2335.00 mm,降雨主要集中在夏季,冬季较厚的稳定积雪在春季消融下渗并形成50~60 cm的悬湿沙层^[10-12]。古尔班通古特沙漠土壤大多为风沙土,其中固定风沙土主要出露于垄间低地及沙垄中下部,半固定风沙土多分布于沙垄中部和中上部^[13]。沙漠地区发育了许多具有耐旱、耐高温、耐强辐射、耐寒、耐盐碱等高光合效率特征

的沙漠植物群落^[14]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

(1) 搜集了新疆北部地区4类不同研究载体记录的全新世气候变化,特别是湿度变化数据,包含黄土-古土壤序列、湖泊沉积、泥炭沉积、石笋沉积(图1)。(2) 收集了古尔班通古特沙漠及其邻近地区风沙活动环境记录,如典型风成沙-古土壤-河湖相沉积序列、典型湖泊风沙组分/强度变化记录以及中天山地区风成沙-土壤序列。气候变化背景记录选择标准:① 时间尺度上至少覆盖2/3全新世或整个全新世,年代序列以ka(OSL年代)和cal ka BP(¹⁴C年代校正后)表示。② 对所选研究记录样品的年代数据以0.5 ka为尺度进行降维处理。③ 明确的代用指标环境意义。如黄土-古土壤序列中磁化率(MS)、低频磁化率(χ_{lf})、频率磁化率(χ_{mf})、非磁滞磁化率与饱和等温剩磁的比值($\chi_{ARM}/SIRM$)等磁学指标^[15-18],湖泊沉积中藁属与藜科孢粉比(A/C)^[19-22]以及定量降水记录(P_{ann})^[23-24]、介形虫壳体 $\delta^{18}O$ ^[25]、年平均降水量(MAP)^[26]、实际/潜在蒸散比(AET/PET)^[27]、泥炭沉积中腐殖化程度(HD)^[28]和泥炭纤维素 $\delta^{13}C$ ^[29],以及石笋记录中的微量元素比值^[30]。这些代用指标已经在该区域不同研究载体中广泛应用,并切实指示区域气候变化或有效湿度变化过程(表1)。



注:字母及数字分别对应表1、2中序号,详见表1、表2。

图1 新疆北部考察点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the investigation sites in northern Xinjiang

风沙活动环境记录选择标准如下:①有确切的OSL或者¹⁴C年龄,年代控制介于0~12 ka之间;对原始文献中未校正的¹⁴C年代采用Calibration 8.1.0程序进行校正,选取INTCAL13北半球非海洋陆地校正模式,表示为cal ka BP,OSL年代用ka表示。连续的湖泊沉积记录采用深度年代模式转化为时间序列。②有明确岩性记录,如风成沙、古土壤或者河湖相沉积,以便可以直接利用沉积物岩性变化来展示风沙活动或者沙漠演化过程。湖泊沉积记录采用岩性特征或者标准化后的曲线趋势来判定风沙活动强度。需要强调的是,古尔班通古特沙漠周边风成沉积岩性存在空间异质性,因此,进一步结合岩性及其中包含的植物、生物残体或者物质组成来判断其地层单元对风沙活动/沙漠演化的指示意义。古风成砂被认为是风沙活动较强的标志;枯枝落叶沉积表明存在短暂的降雨增多时期,沙漠开始固定、逆转;弱砂质古土壤沉积表明植被稍多,流沙固定、逆转;砂质古土壤沉积是流沙充分固定、生草成壤的产物,表明沙漠强烈逆转,风沙活动弱^[6,8]。当地层沉积中为单一风成沙时则采用其他代用指标来指示,如梧桐沟钻孔中中值粒径的高值和低值

可能分别代表风沙活动增强与减弱的强度变化^[7]。此外,根据前人的研究可以发现当剖面中含有植物根系、螺壳等水成沉积物时则往往对应于风沙活动弱的时期^[31-35](表2)。

2.2 分析方法

利用Origin程序以0.5 ka为组距进行降维处理,之后依据黄土-古土壤序列、湖泊沉积、泥炭沉积以及石笋沉积4个不同的沉积类型将降维后的数据做标准化,最后分别进行主成分分析(PCA)和算数平均计算(Z-score)。同时,对上述不同沉积序列(N=20)进行PCA和算数平均,用来指示多湿度代用指标集成的湿度演化模式。

风沙活动/沙漠演化过程的集成,主要依靠原始文献中绝对年代与岩性指示意义进行综合提取,如风成沙层代表风沙活动最强的时期,过渡层的出现表明风沙活动减弱,弱古土壤层意味着风沙活动进一步的减弱,强古土壤层则指示了风沙活动最弱的时期。然后根据其在0.5 ka尺度上的变化,累积为风沙活动(风成沙层)和非风沙活动(过渡层、弱古土壤层、强古土壤层、黏土层、含螺壳、硅藻等的沉积层)的数量,风沙活动数值的高低分别代表区域

表1 新疆北部记录全新世以来湿度演化的文献

Tab. 1 Records of humidity evolution since Holocene in northern Xinjiang

序号	类型	剖面名称	剖面位置	时间跨度/ka	测年手段	年代数/个	参考文献
A	黄土-古土壤序列	LJW剖面	43.975°N, 85.336°E	12.0~0.0	OSL	14	Chen等 ^[16]
B	黄土-古土壤序列	ZKT剖面	43.537°N, 83.314°E	12.0~0.5	¹⁴ C	5	Chen等 ^[16]
C	黄土-古土壤序列	TLD16剖面	43.335°N, 83.018°E	12.0~0.0	OSL	15	Jia等 ^[17]
D	黄土-古土壤序列	KS16剖面	43.432°N, 83.943°E	11.5~1.0	OSL	14	Jia等 ^[17]
E	黄土-古土壤序列	HC14剖面	44.600°N, 87.563°E	10.5~2.0	¹⁴ C	5	Jia等 ^[17]
F	黄土-古土壤序列	TLD剖面	43.401°N, 83.037°E	11.5~1.0	OSL	8	Kang等 ^[18]
G	黄土-古土壤序列	XEB剖面	43.422°N, 82.933°E	12.0~1.0	OSL	8	Kang等 ^[18]
H	黄土-古土壤序列	ZS剖面	42.934°N, 80.956°E	11.5~0.5	OSL	10	Kang等 ^[18]
I	湖泊沉积	博斯腾湖钻孔	41.978°N, 87.244°E	8.5~0.0	OSL、 ¹⁴ C	12	Huang等 ^[31]
J	湖泊沉积	乌伦古湖钻孔	47.273°N, 87.137°E	9.5~0.0	¹⁴ C	6	蒋庆丰等 ^[25]
K	湖泊沉积	赛里木湖钻孔	44.609°N, 81.117°E	12.0~0.0	¹⁴ C	12	Jiang等 ^[19]
L	湖泊沉积	喀纳斯湖钻孔	48.730°N, 87.020°E	12.0~0.0	¹⁴ C	9	Huang等 ^[23]
M	湖泊沉积	巴里坤湖钻孔	43.629°N, 92.808°E	11.0~0.0	¹⁴ C	12	An等 ^[32]
N	湖泊沉积	艾比湖钻孔	44.906°N, 82.904°E	12.0~0.0	¹⁴ C	8	Wang等 ^[33]
O	泥炭沉积	铁力沙汗泥炭	48.809°N, 86.920°E	9.0~0.0	¹⁴ C	5	Zhang等 ^[28]
P	泥炭沉积	柴窝堡泥炭	43.496°N, 87.910°E	8.5~0.0	¹⁴ C	19	Hong等 ^[29]
Q	泥炭沉积	克拉沙子泥炭	48.117°N, 88.370°E	11.5~3.5	¹⁴ C	14	Wang等 ^[24]
R	泥炭沉积	那仁夏泥炭	48.800°N, 86.900°E	11.5~0.0	¹⁴ C	9	Feng等 ^[26]
S	泥炭沉积	温泉-1泥炭	44.972°N, 81.030°E	10.0~0.0	¹⁴ C	8	Li等 ^[27]
T	石笋沉积	布鲁克石笋	42.433°N, 88.733°E	9.0~0.5	ICP-MS	19	Liu等 ^[30]

chinaXiv:202305.00194v1

表2 古尔班通古特沙漠及其周边记录全新世以来风沙活动的文献

Tab. 2 Records of aeolian activity in Gurbantunggut Desert and its surroundings since Holocene

序号	类型	剖面名称	剖面位置	时间跨度/ka	测年手段	年代数/个	代用指标	参考文献
1	风成沙序列	梧桐沟钻孔	44.467°N, 87.864°E	12.0~0.0	OSL	10	粒度、磁化率等	Li等 ^[7]
2	风成沙-河湖相序列	沙漠钻孔	44.497°N, 88.183°E	8.0~5.0	TL	5	粒度、孢粉等	黄强等 ^[34]
3	风成沙-古土壤序列	莫索湾剖面	44.667°N, 86.333°E	11.0~0.5	¹⁴ C、TL	9	粒度、CaCO ₃ 等	陈惠中等 ^[6]
4	风成沙-河湖相序列	MGDD	44.325°N, 86.238°E	4.5~4.0	¹⁴ C	2	粒度、有机质等	马妮娜 ^[35]
5	风成沙-河湖相序列	4C2L	44.619°N, 86.624°E	5.5~5.0	¹⁴ C	2	粒度、有机质等	马妮娜 ^[35]
6	风成沙-河湖相序列	23SGZ	45.143°N, 85.958°E	1.0~0.0	¹⁴ C	1	粒度、有机质等	马妮娜 ^[35]
7	风成沙-河湖相序列	TDG-A	44.696°N, 86.766°E	6.0~5.0	¹⁴ C	1	粒度、有机质等	马妮娜 ^[35]
8	湖泊沉积	东道海子B剖面	44.666°N, 87.570°E	5.0~0.0	¹⁴ C	8	粒度、孢粉等	马妮娜等 ^[36]
9	湖泊沉积	东道海子剖面DDH	44.604°N, 87.590°E	6.5~0.0	OSL	5	粒度、磁化率等	何冬 ^[37]
10	湖泊沉积	东道海子钻孔	44.643°N, 87.575°E	12.0~0.0	¹⁴ C	5	粒度、孢粉等	李志忠等 ^[38-39]
11	湖泊沉积	BLK-1	43.700°N, 92.833°E	9.4~0.0	¹⁴ C	7	粒度	薛积彬等 ^[40]
12	风成沙-土壤序列	THE-1~THE-8	42°42'0"~43°12'0"N, 83°15'0"~84°45'0"E	12.0~0.0	OSL	79	粒度、磁化率等	Long等 ^[8]

风沙活动的增强与减弱,而非风沙活动数值的高低与前者相反。对于湖相沉积则采用了不同的判断方式:(1)依据岩性等代用指标来判断:风沙沉积为主代表风沙活动强烈,水成作用增强说明风沙活动减弱。(2)将粒度敏感组分曲线标准化后判断:>0表明风沙活动强烈,且当值越大时风沙活动越强,相反则意味着风沙活动减弱,中值粒径曲线则在<0时表明风沙活动强烈,且当值越小时风沙活动越强,相反则意味着风沙活动减弱。进一步,利用风沙活动/非风沙活动的数量与0.5 ka时间尺度上沉积记录的总数进行百分比计算,其百分比的高低也分别指示风沙活动的增强与减弱。即从有确切年代控制的视角下,从风沙活动/非风沙活动的绝对数量和相对百分比变化来指示区域风沙活动/沙漠演化的程度。

3 结果与分析

3.1 古尔班通古特沙漠及周边地区全新世气候/湿度变化背景

3.1.1 黄土-古土壤序列 黄土-古土壤沉积序列主体位于新疆西部地区的伊犁河谷地区 and 天山北麓(图1中A~H)。对前人利用不同的磁学指标所研究的8个黄土-古土壤沉积序列的分析结果(图2a~h)进行梳理,发现该区域全新世以来由于干旱向湿润环境演变的起始时间存在差异,但在整体上皆表现为早全新世气候干旱,中晚全新世以来湿度逐渐增加(图2a~h)^[16-18]。基于8个黄土-古土壤沉积序列的

湿度数据计算所得出PCA和Z-score,结果显示6 ka之前曲线处于低水平阶段,在整个全新世尺度上总体呈现出持续上升的趋势,表明该研究区全新世早期气候干旱,6 ka以来气候环境好转,区域湿度增加(图2u)。

3.1.2 湖泊沉积记录 湖泊钻孔记录广泛分布于新疆北部周边地区(图1中I~N)。对前人利用不同的沉积载体进行的研究结果进行梳理,发现各研究点之间的干湿记录存在差异,但整体来看,8 ka似乎是区域干湿转变的一个转折点,12~8 ka区域气候普遍干旱,8 ka左右气候开始逐渐变得湿润(图2i~n)^[19,23,25,31-33,41]。通过对梳理的6个湖泊钻孔记录进行了PCA计算和Z-score集成(图2v),可以看出该研究区域尽管在全新世以来发生了多次干湿波动,但总体上表现为湿度持续增加的趋势。

3.1.3 泥炭和石笋沉积记录 泥炭和石笋沉积记录主要分布在天山、阿尔泰山等山麓地区(图1中O~T)。基于前人利用不同的气候代用指标所研究的5个泥炭剖面的分析结果(图2o~s)进行梳理,发现该研究区在8 ka之前普遍气候比较干旱,之后逐渐变得湿润^[24,26-29]。对以上5个泥炭沉积序列环境代用指标的PCA计算及Z-score集成(图2w)结果进一步验证了这一结论。此外,Liu等^[30]对布鲁克石笋中Mg/Ca的研究结果也表明该研究区中晚全新世以来湿度增加(图2t)。

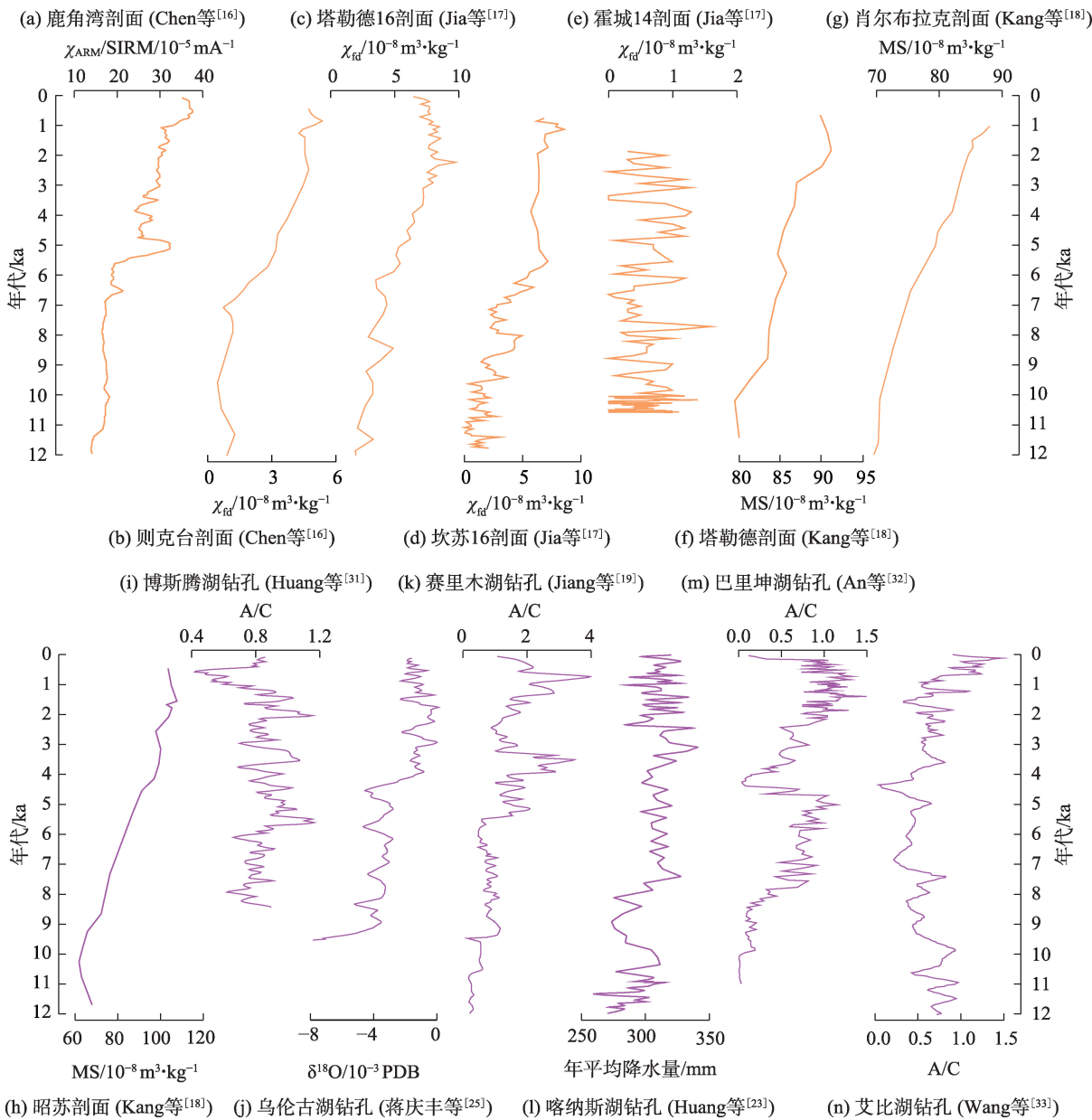
通过对上述各类型沉积序列环境代用指标数据的对比分析可以发现新疆北部地区全新世以来

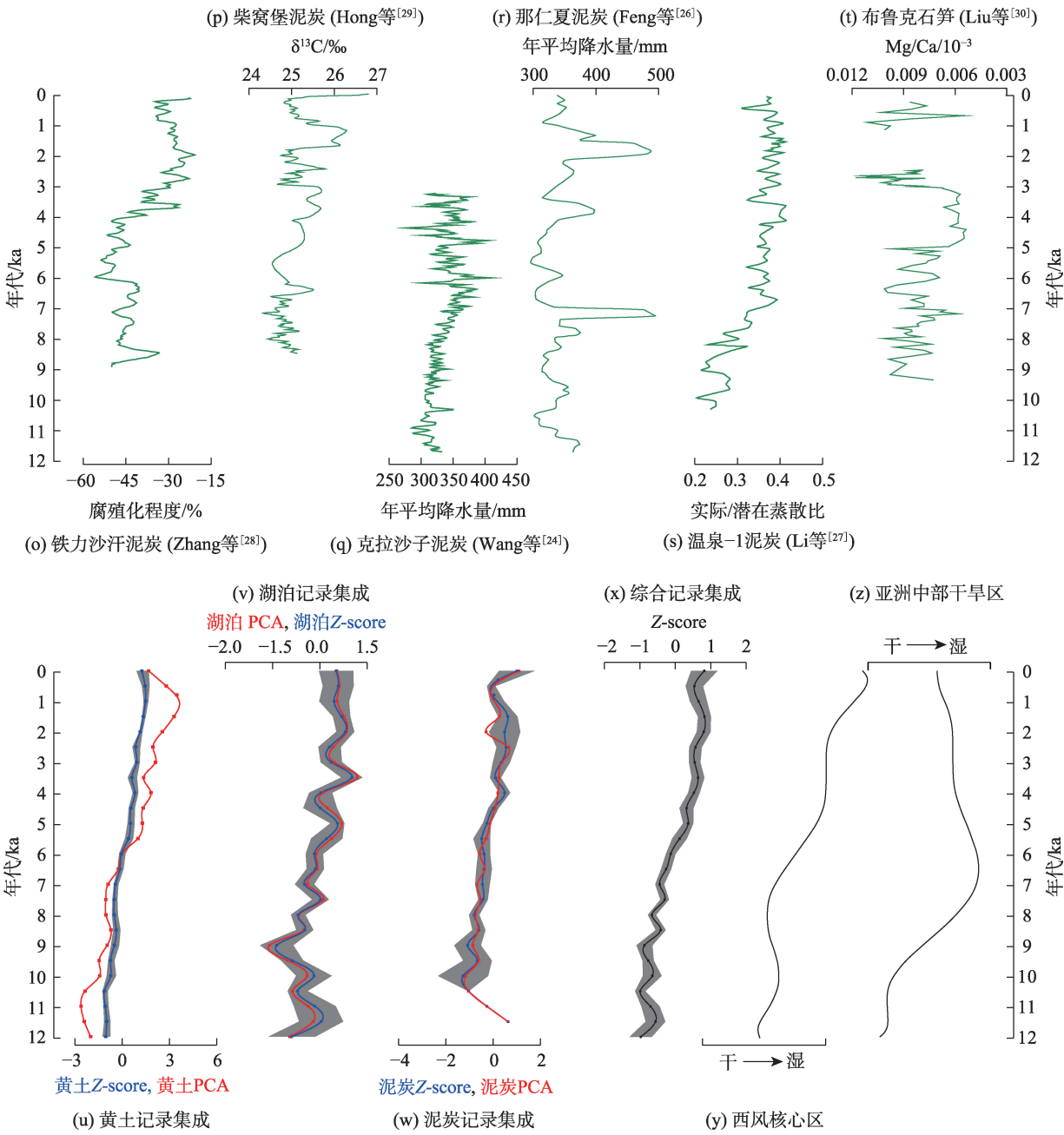
遵循湿度持续增加的模式。20个不同类型沉积序列的环境代用指标数据的Z-score计算和PCA分析,结果指示该研究区全新世早期气候干燥,6 ka以来气候逐渐湿润,晚全新世湿度最优,在整个全新世期间湿度为持续增加的模式(图2x)基本与前人认为的西风核心区的湿度演化模式总体一致,均表现为全新世以来湿度变化为逐渐增加的过程,晚全新世期间湿度最优。这明显有别于之前的亚洲中部干旱区气候变化的“干旱区模式”(图2y~z)。

3.2 古尔班通古特沙漠及其周边风沙活动过程的集成

3.2.1 沙漠内部及南缘风沙沉积记录 Li等^[7]和 Huang等^[34]利用年代数据及多气候代用指标分别对沙漠

内部的钻孔进行了研究,发现该研究区在早中全新世风沙活动强烈,中晚全新世以来风沙活动渐趋减弱(图3a~b)。陈惠中等^[6]依据剖面年代学、地层沉积相以及气候代用指标对古尔班通古特沙漠西南隅的莫索湾全新世地层剖面分析认为早全新世(10.8~7.9 cal ka BP)期间风沙活动强烈;8.0~4.5 cal ka BP期间为本区全新世最佳期(大暖期);4.5 cal ka BP以来整个风沙活动强烈,但其中伴随有数次增湿事件(图3c)。马妮娜^[35]对沙漠南缘4处剖面的分析结果表明该区域在晚全新世(5.5~0.8 ka)风沙活动较弱,气候条件较好(图3d~g)。不难发现,前人在对沙漠内部及南缘地区的风成沉积剖面的研究结果存在分歧,相较于湿度变化,研究区内全新世以来的风





注： $\chi_{ARM}/SIRM$ 为非磁滞磁化率与饱和等温剩磁的比值； χ_m 为频率磁化率；MS 为磁化率；A/C 为蒿属与藜科孢粉比；PCA 为主成分分析；Z-score 为算数平均计算；阴影部分为算数平均计算对应误差。下同。

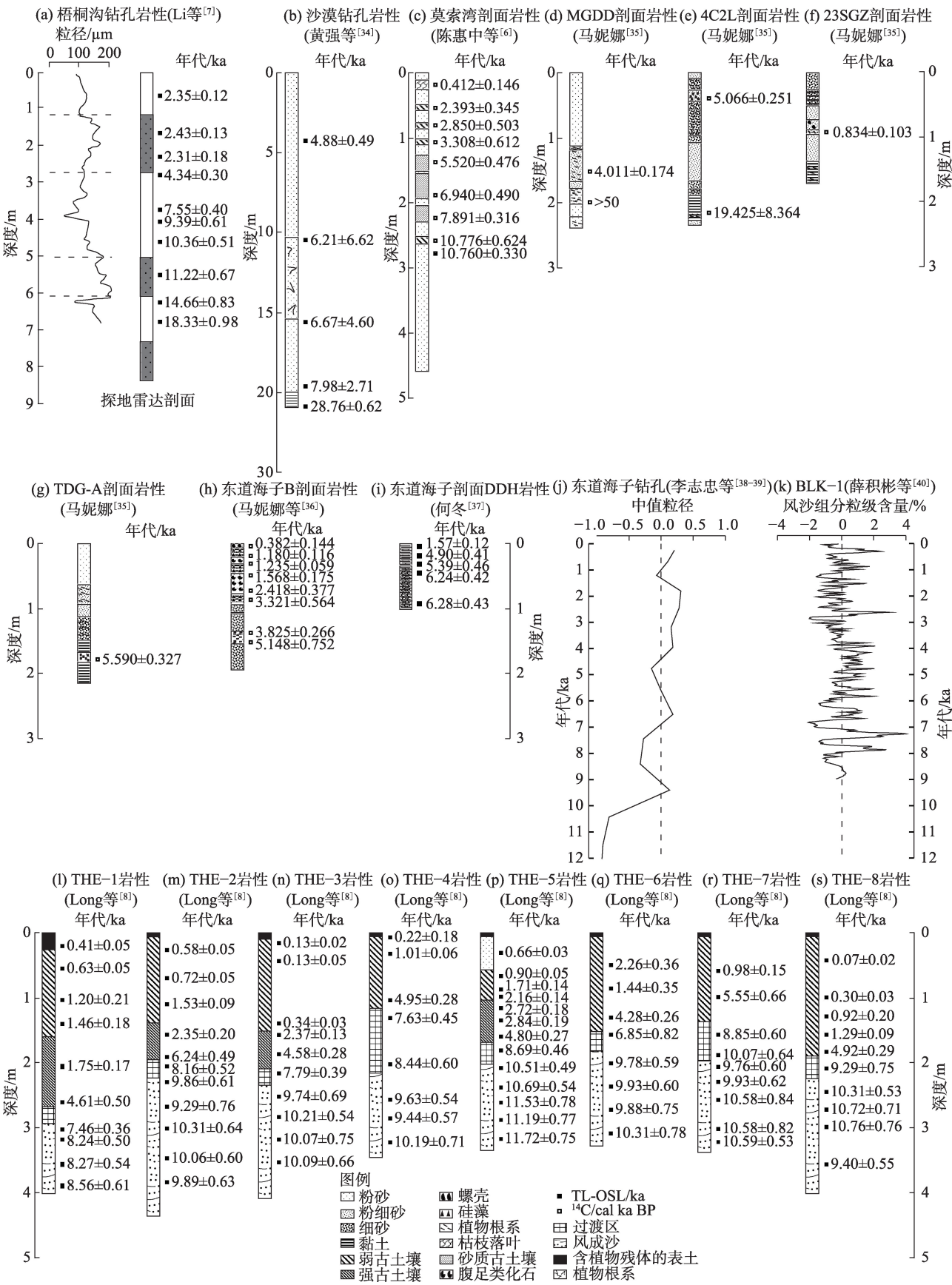
图2 新疆北部地区全新世气候/湿度记录

Fig. 2 Holocene climate/humidity records in northern Xinjiang

沙活动记录存在较大差异。

3.2.2 沙漠周边湖泊沉积记录 前人对位于古尔班通古特沙漠南缘的东道海子进行了多次研究,并取得一定的成果^[36-39]。通过梳理,发现该区域在早中全新世(12~6 ka)风沙活动较强,中晚全新世以来水成作用逐渐显著,风沙活动逐渐减弱(图 3h~j)。薛积彬等^[40]对 BLK-1 剖面粒度敏感组分提取发现

9.4~6.0 cal ka BP 期间风沙组分含量较高,风沙活动强烈,且有数次强风沙活动的发生;在 6.0~1.8 cal ka BP 期间风沙组分含量居于低值,风沙活动较弱;1.8 cal ka BP 以来风沙组分的含量及其波动说明风沙活动的再一次增强(图 3k)。通过对前人在沙漠周边湖泊沉积记录所做的研究成果进行梳理,发现尽管结论有所差异,但普遍认为该研究区 6 ka 之前



注:图3a探地雷达剖面指示暗色区域较白色区域内沉积物粒度更粗。

图3 古尔班通古特沙漠及周边区域各沉积剖面岩性

Fig. 3 Lithology of sedimentary profiles in Gurbantunggut Desert and its surrounding areas

风沙活动强烈,中晚全新世以来风沙活动减弱。

3.2.3 天山巴音布鲁克盆地风沙沉积记录 Long等^[8]

结合地层岩性和环境代用指标分析(粒度、磁化率和总有机含量),利用THE-1~THE-8剖面OSL测年数据,重建了盆地沙丘堆积的演化过程。其结果表明:12~8 ka风沙活动最强烈,8~7 ka开始成壤,7~2 ka之间土壤发育程度逐渐加强(特别是5~2 ka),风沙活动强度最弱,~2 ka以来向弱古土壤的转变则意味着风沙活动有所增强,但明显弱于早全新世(图3l~s)。

不难发现,古尔班通古特沙漠及其周边区域所记录的全新世以来的风沙活动强弱变化存在差异:(1)区域气候在亚洲季风-中纬西风强度变化交替控制的作用下呈现温湿(凉湿)、冷干波动、风沙活动相应变化的类“季风模式”,如莫索湾剖面^[6]。(2)受西风环流的控制,研究区气候总体上遵循早全新世气候干旱、风沙活动强烈,中晚全新世湿度逐渐增加、风沙活动逐渐减弱的类“西风模式”,如巴音布鲁克盆地剖面^[8]。基于前述剖面年代控制和沉积岩性的综合分析发现,研究区早全新世地层风沙堆积,风沙活动强烈,中晚全新世以来地层逐渐发育古土壤,粒度细化,风沙活动减弱。风沙活动/非风沙活动的绝对数量和相对百分比变化,指示区域风沙活动/沙漠演化程度进一步验证了这一结论:早全新世风沙活动非常强烈,中晚全新世以来风沙活动强度显著降低,6~4 ka期间风沙活动强度的再一次增加可能是研究区有效记录的缺乏所导致(图4)。这与我们所建立的气候/湿度变化背景过程在总体上相一致,可能暗示了古尔班通古特沙漠及其周边区域全新世风沙环境演变基本遵循西风模式。

3.3 古尔班通古特沙漠及周边区域全新世环境演变可能的驱动机制

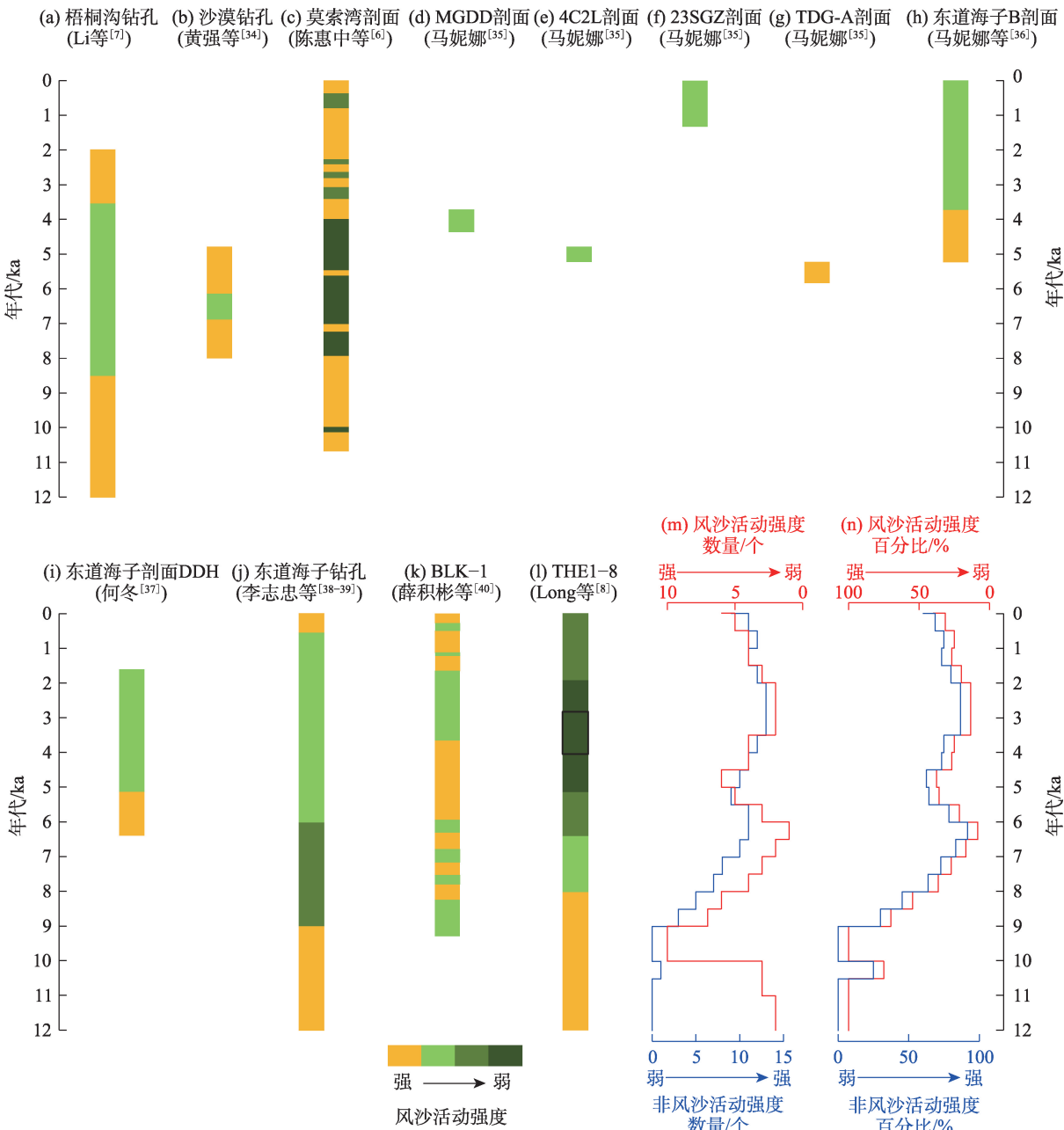
前人研究表明亚洲中部干旱区特别是西风核心区全新世气候/湿度变化总体遵循西风模式。图5基于新疆北部地区多类型沉积序列集成的气候/湿度背景、区域风沙活动记录以及内外部驱动因素探讨了古尔班通古特沙漠及周边地区全新世以来的环境演变过程。集成的气候/湿度背景(图5a~d、l)及风沙活动记录(图5m~n)表明在早全新世气候干燥/湿度较低、风沙活动强烈,而中晚全新世以来气候湿润/湿度增加、风沙活动减弱。此外,集成的湿度指数与非风沙活动百分占比进行的相关性分析结果显示两者显著正相关、相关系数为0.719($P <$

0.01, $N=25$),表明研究区风沙活动受控于湿度变化。

全新世以来,古尔班通古特沙漠地区的湿度变化情况可分为2个阶段。具体来说,在早中全新世(12~6 ka),较弱的45°N冬季太阳辐射(图5e),可能导致地中海、黑海等西风区上风向水体表面蒸发较弱^[2-3]。同时,较强的大西洋经向翻转环流(AMOC)(图5i)携带大量的热量向高纬度地区传输,导致格陵兰岛、冰岛等高纬度地区冰盖升温、融水增加,由此形成的北大西洋海表低温使得该地区蒸发减少^[2,42-44]。相对较高的夏季温度(图5f)及45°N夏季太阳辐射(图5g)导致副热带高压北移,使得西风区内的降水强度受到制约^[2,45-46]。因此,该研究区可获得的水汽供给较少。此外,冬季弱太阳辐射导致中高纬度(35°~55°N)经向梯度差较小(图5j~k),使得西风环流的强度较弱^[44]。因此在全新世早期,受制于太阳辐射强度、冰量等因素最终形成了一个西风环流较弱、可送达水汽量较少的气候背景,导致包含古尔班通古特沙漠在内的新疆北部地区早全新世气候干旱,风沙活动强烈。中晚全新世(6 ka以来)以来则呈现出相反的情况,随着45°N冬季太阳辐射(图5e)的增强使得地中海等上风向区域蒸发较强^[2-3],北半球高纬度地区的冰量(图5h)几乎消融殆尽,冰量的强迫影响作用微乎其微,北大西洋等海表温度升高,蒸发量增多,可以为研究区提供充足的水汽^[2,42-44]。另一方面,夏季温度(图5f)及45°N夏季太阳辐射(图5g)的减弱导致副热带高压南移^[2]的同时,也使得本研究区的蒸发减少,相对水汽含量增多。并且,随着中高纬度间的太阳辐射梯度差逐渐增加(图5j~k),西风环流相应增强^[16,44]。因此,充足的水汽源以及强劲的西风可以为该研究区带来更多的降水,这与我们所重建的湿度逐渐增加、风沙活动强度显著降低的结果相一致。因此,该研究区全新世以来的气候好转/湿度增加可能是高纬地区水汽增多、副热带高压南移和中纬度地区西风环流增强综合作用的结果^[2]。综上所述,我们认为古尔班通古特沙漠及其周边区域全新世以来的环境演变主要受西风环流的控制。

4 结论

(1) 通过对各类型沉积序列环境代用指标的集



注:图1由THE-1~THE-8共8个剖面中79个OSL测年数据所集成,详见Long等^[8]。

图4 古尔班通古特沙漠及其周边区域风沙活动强度

Fig. 4 Intensity of aeolian activity in Gurbantungut Desert and its surrounding areas

成分析发现该区全新世以来湿度变化总体呈现持续增加的模式。其结果表明区域全新世早期气候干燥,6 ka以来气候逐渐湿润,晚全新世湿度最优,在整个全新世尺度湿度持续增加。

(2) 基于古尔班通古特沙漠及其周边区域内各沉积剖面年代控制和沉积岩性的综合分析以及基于风沙活动/非风沙活动的绝对数量和相对百分比变化来指示的区域风沙活动/沙漠演化程度皆表明:

研究区早全新世地层风沙堆积,风沙活动强烈;中晚全新世以来地层逐渐发育古土壤,粒度细化,风沙活动减弱。

(3) 基于湿度记录重建的气候背景及区域风沙活动记录研究结果的对比分析,发现该区环境演变总体遵循“西风模式”,即早全新世气候干旱,风沙活动强烈;中晚全新世以来风沙活动逐渐减弱,湿度逐渐增加。即该区环境演变主要受西风环流的控制。

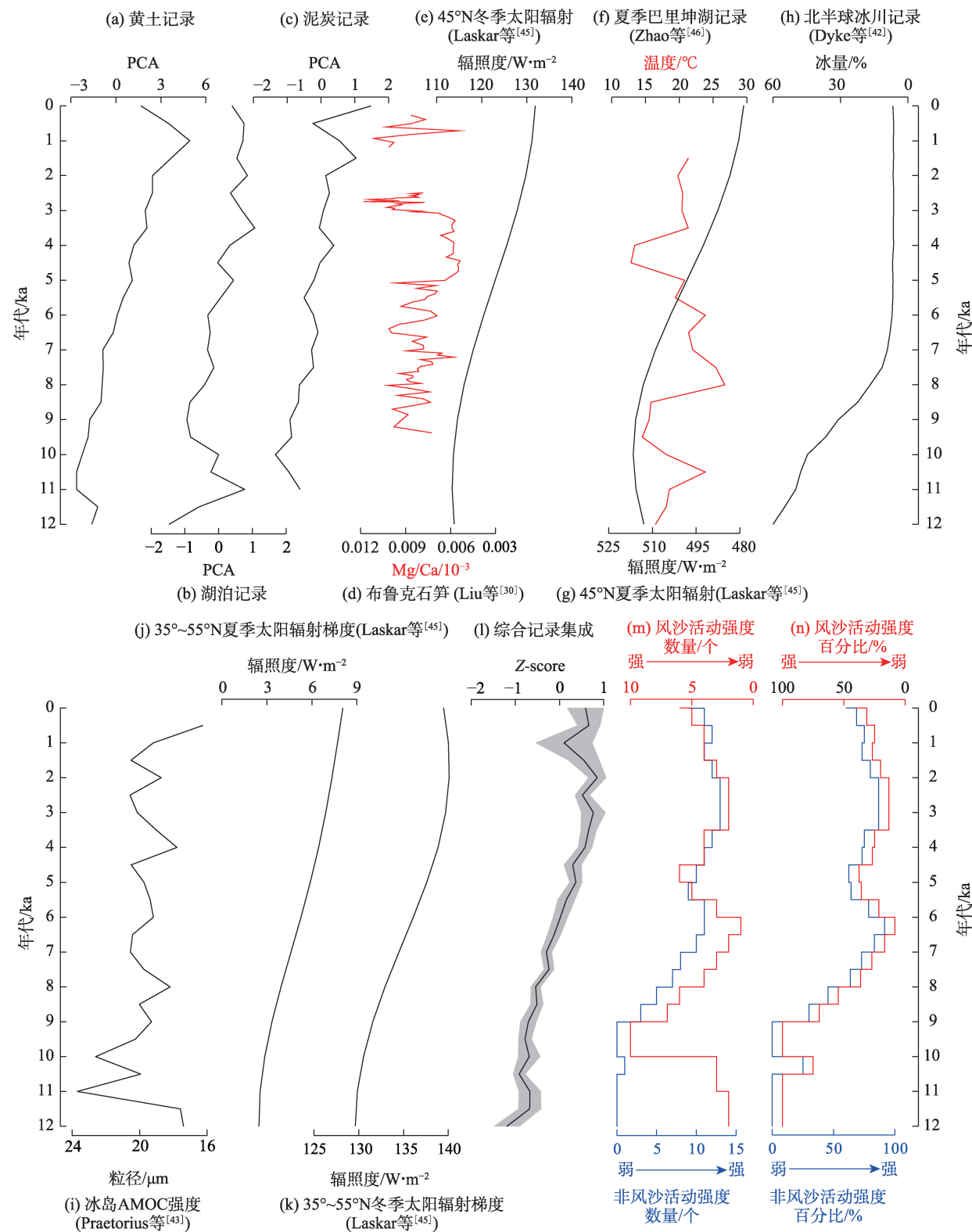


图5 全新世以来古尔班通古特沙漠环境演变的驱动机制

Fig. 5 Driving mechanism of environmental evolution in Gurbantunggut Desert since Holocene

参考文献 (References)

[1] 陈发虎, 黄小忠, 杨美临, 等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式——以新疆博斯腾湖记录为例[J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 881-887. [Chen Fahu, Huang Xiaozhong, Yang Meilin, et al. Westerly dominated Holocene climate model in arid Central Asia: Case study on Bosten Lake, Xinjiang, China[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(6): 881-887.]

2006, 26(6): 881-887. [Chen Fahu, Huang Xiaozhong, Yang Meilin, et al. Westerly dominated Holocene climate model in arid Central Asia: Case study on Bosten Lake, Xinjiang, China[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(6): 881-887.]

- [2] Chen F H, Chen J H, Huang W, et al. Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 337–354.
- [3] Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid Central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(3–4): 351–364.
- [4] Chen J, Huang W, Jin L Y, et al. A climatological northern boundary index for the East Asian summer monsoon and its interannual variability[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(1): 13–22.
- [5] Feng S, Hu Q, Huang W, et al. Projected climate regime shift under future global warming from multi-model, multi-scenario CMIP5 simulations[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 41–52.
- [6] 陈惠中, 金炯, 董光荣. 全新世古尔班通古特沙漠演化和气候变化[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(4): 333–339. [Chen Huizhong, Jin Jiong, Dong Guangrong. Holocene evolution processes of Gurbantunggut Desert and climatic changes[J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(4): 333–339.]
- [7] Li S H, Fan A C. OSL chronology of sand deposits and climate change of last 18 ka in Gurbantunggut Desert, northwest China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2011, 26(8): 813–818.
- [8] Long H, Shen J, Chen J H, et al. Holocene moisture variations over the arid Central Asia revealed by a comprehensive sand-dune record from the central Tian Shan, NW China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 174: 13–32.
- [9] 钟德才. 中国沙漠动态演化[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1998: 181–187. [Zhong Decai. *Dynamic evolution of sand desert in China* [M]. Lanzhou: Gansu Culture Publishing House, 1998: 181–187.]
- [10] 钱亦兵, 吴兆宁. 古尔班通古特沙漠环境研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 2–28. [Qian Yibing, Wu Zhaoning. *Environmental study of the Gurbantunggut Desert*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 2–28.]
- [11] 季方, 叶玮, 魏文寿. 古尔班通古特沙漠固定与半固定沙丘成因初探[J]. *干旱区地理*, 2000, 23(1): 32–36. [Ji Fang, Ye Wei, Wei Wenshou. Preliminary study on the formation causes of the fixed and semi-fixed dunes in Gurbantonggut Desert[J]. *Arid Land Geography*, 2000, 23(1): 32–36.]
- [12] 刘瑞, 李志忠, 靳建辉, 等. 古尔班通古特沙漠西南缘新月形沙丘内部沉积构造特征研究[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(3): 802–813. [Liu Rui, Li Zhizhong, Jin Jianhui, et al. Internal sedimentary structure of barchan dune in the southwest of Gurbantunggut Desert[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(3): 802–813.]
- [13] Qian Y B, Wu Z N, Zhao R F, et al. Vegetation patterns and species-environment relationships in the Gurbantunggut Desert of China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(4): 400–414.
- [14] 刘铮瑶. 古尔班通古特沙漠沙丘地貌及其发育环境[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020. [Liu Zhengyao. *Dune landform and its development environment in Gurbantunggut Desert*[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2020.]
- [15] 温仰磊, 王友郡, 柳加波, 等. 准噶尔盆地南缘黄土磁化率变化规律及影响因素[J]. *地球环境学报*, 2014, 5(2): 85–92. [Wen Yanglei, Wang Youjun, Liu Jiabo, et al. Variation and influencing factors of loess susceptibility in the southern margin of Junggar Basin[J]. *Journal of Earth Environment*, 2014, 5(2): 85–92.]
- [16] Chen F H, Jia J, Chen J H, et al. A persistent Holocene wetting trend in arid Central Asia, with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-paleosol sequences in Xinjiang, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 146: 134–146.
- [17] Jia J, Chen J H, Wang Z Y, et al. No evidence for an anti-phased Holocene moisture regime in mountains and basins in Central Asian: Records from Ili loess, Xinjiang[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 572: 110407, doi: 10.1016/j.palaeo.2021.110407.
- [18] Kang S G, Wang X L, Roberts H M, et al. Increasing effective moisture during the Holocene in the semiarid regions of the Yili Basin, Central Asia: Evidence from loess sections[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 246: 106553, doi: 10.1016/j.quascirev.2020.106553.
- [19] Jiang Q F, Ji J F, Shen J, et al. Holocene vegetational and climatic variation in westerly-dominated areas of Central Asia inferred from the Sayram Lake in northern Xinjiang, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(3): 339–353.
- [20] 孙湘君, 杜乃秋, 翁成郁, 等. 新疆玛纳斯湖盆周围近14000年以来的古植被古环境[J]. *第四纪研究*, 1994, 14(3): 239–248. [Sun Xiangjun, Du Naiqiu, Weng Chengyu, et al. Paleovegetation and paleoenvironment of Manasi Lake, Xinjiang, NW China during the last 14000 years[J]. *Quaternary Sciences*, 1994, 14(3): 239–248.]
- [21] Herzschuh U, Tarasov P, Wünnemann B, et al. Holocene vegetation and climate of the Alashan Plateau, NW China, reconstructed from pollen data[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 211(1–2): 1–17.
- [22] Zhang D L, Feng Z D. Holocene climate variations in the Altai Mountains and the surrounding areas: A synthesis of pollen records [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 847–869.
- [23] Huang X Z, Peng W, Rudaya N, et al. Holocene vegetation and climate dynamics in the Altai Mountains and surrounding areas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(13): 6628–6636.
- [24] Wang W, Zhang D L. Holocene vegetation evolution and climatic dynamics inferred from an ombrotrophic peat sequence in the southern Altai Mountains within China[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 179: 10–22.
- [25] 蒋庆丰, 沈吉, 刘兴起, 等. 西风区全新世以来湖泊沉积记录的高分辨率古气候演化[J]. *科学通报*, 2007, 52(9): 1042–1049. [Jiang Qingfeng, Shen Ji, Liu Xingqi, et al. A high resolution climatic change since Holocene inferred from multi proxy of lake sedi-

- ment in westerly area of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(9): 1042–1049.]
- [26] Feng Z D, Sun A Z, Abdusalih N, et al. Vegetation changes and associated climatic changes in the southern Altai Mountains within China during the Holocene[J]. The Holocene, 2016, 27(5): 683–693.
- [27] Li J Y, Wang N L, Dodson J, et al. Holocene negative coupling of summer temperature and moisture availability over southeastern arid Central Asia[J]. Climate Dynamics, 2020, 55(5): 1187–1208.
- [28] Zhang Y, Meyers P A, Liu X T, et al. Holocene climate changes in the Central Asia mountain region inferred from a peat sequence from the Altai Mountains, Xinjiang, northwestern China[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 152: 19–30.
- [29] Hong B, Gasse F, Uchida M, et al. Increasing summer rainfall in arid eastern-Central Asia over the past 8500 years[J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 1–10.
- [30] Liu X K, Liu J B, Shen C C, et al. Inconsistency between records of $\delta^{18}\text{O}$ and trace element ratios from stalagmites: Evidence for increasing mid-late Holocene moisture in arid Central Asia[J]. The Holocene, 2019, 30(3): 369–379.
- [31] Huang X Z, Chen F H, Fan Y X, et al. Dry late-glacial and early Holocene climate in arid Central Asia indicated by lithological and palynological evidence from Bosten Lake, China[J]. Quaternary International, 2009, 194(1–2): 19–27.
- [32] An C B, Lu Y B, Zhao J J, et al. A high-resolution record of Holocene environmental and climatic changes from Lake Balikun (Xinjiang, China): Implications for Central Asia[J]. The Holocene, 2012, 22(1): 43–52.
- [33] Wang W, Feng Z D, Ran M, et al. Holocene climate and vegetation changes inferred from pollen records of Lake Aibi, northern Xinjiang, China: A potential contribution to understanding of Holocene climate pattern in East-Central Asia[J]. Quaternary International, 2013, 311: 54–62.
- [34] 黄强, 周兴佳. 晚更新世晚期以来古尔班通古特沙漠南部的气候环境演化[J]. 干旱区地理, 2000, 23(1): 55–60. [Huang Qiang, Zhou Xingjia. The climate-environment changes in the south of Gurbantunggut Desert since 80 ka BP[J]. Arid Land Geography, 2000, 23(1): 55–60.]
- [35] 马妮娜. 全新世以来古尔班通古特沙漠南缘风沙活动研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2005. [Ma Ni'na. Study of aeolian activity in the southern margin of Gurbantunggut Desert since Holocene[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2005.]
- [36] 马妮娜, 穆桂金, 阎顺. 中全新世以来乌鲁木齐东道海子B剖面沉积物源探讨与分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(2): 188–193. [Ma Ni'na, Mu Guijin, Yan Shun. Grain-size analyses and detrital sediment discuss of the B profile of Dongdaohaizi in Urumqi since the middle Holocene[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(2): 188–193.]
- [37] 何冬. 乌鲁木齐东道海子沉积记录的中全新世以来气候变化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016. [He Dong. Study of climate change from sediments recorded of Dongdaohaizi in Urumqi since the middle Holocene[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2016.]
- [38] 李志忠, 海鹰, 罗若愚, 等. 乌鲁木齐河下游地区湖泊沉积物的粒度特征与沉积环境[J]. 干旱区研究, 2000, 17(3): 1–5. [Li Zhizhong, Hai Ying, Luo Ruoyu, et al. Grain-size characteristics and sedimentary environment in the lacustrine deposit of downstream area in Wulumuqi River since 30 ka BP[J]. Arid Zone Research, 2000, 17(3): 1–5.]
- [39] 李志忠, 海鹰, 周勇, 等. 乌鲁木齐河下游地区 30 ka BP 以来湖泊沉积的孢粉组合与古植被古气候[J]. 干旱区地理, 2001, 24(3): 201–205. [Li Zhizhong, Hai Ying, Zhou Yong, et al. Pollen component of lacustrine deposit and its palaeo-environment significance in the downstream region of Urumqi River since 30 ka BP [J]. Arid Land Geography, 2001, 24(3): 201–205.]
- [40] 薛积彬, 钟巍. 干旱区湖泊沉积物粒度组分记录的区域沙尘活动历史: 以新疆巴里坤湖为例[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 647–654. [Xue Jibin, Zhong Wei. Variations in dust event reflected by grain-size component of lacustrine records in droughty area: A case study on Barkol Lake, Xinjiang, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(4): 647–654.]
- [41] Liu X Q, Herzsuh U, Shen J, et al. Holocene environmental and climatic changes inferred from Wulungu Lake in northern Xinjiang, China[J]. Quaternary Research, 2017, 70(3): 412–425.
- [42] Dyke A S. An outline of north American deglaciation with emphasis on central and northern Canada[J]. Developments in Quaternary Sciences, 2004, 2: 373–424.
- [43] Praetorius S K, McManus J F, Oppo D W, et al. Episodic reductions in bottom-water currents since the last ice age[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(7): 449–452.
- [44] Jin L Y, Chen F H, Morrill C, et al. Causes of early Holocene desertification in arid Central Asia[J]. Climate Dynamics, 2012, 38(7–8): 1577–1591.
- [45] Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. Astronomy & Astrophysics, 2004, 428(1): 261–285.
- [46] Zhao J J, An C B, Huang Y S, et al. Contrasting early Holocene temperature variations between monsoonal East Asia and westerly dominated Central Asia[J]. Quaternary Science Reviews, 2017, 178: 14–23.

Research progress of Holocene environmental evolution in the Gurbantunggut Desert and its surrounding areas

XU Yujie^{1,2}, LIU Bing¹, SUN Aijun^{1,2,3}, WANG Keqi^{1,2}, LI Dongxue^{1,2}, ZHAO Hui¹

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Gurbantunggut Desert (GGD), the largest fixed and semi-fixed desert in northwestern China, is the region most obviously affected by westerly circulation in China. Holocene environmental evolution and its response to global climate change have important scientific significance in understanding the modern surface process and future environmental evolution trends in the GGD. The previously studies on the Holocene environmental evolution of the GGD and its surrounding areas are controversial: some studies have concluded that optimal periods of precipitation/humidity happened in the Middle-Late Holocene, while others concluded that the optimal periods occurred in the Middle Holocene and that the genetic mechanism is in dispute between the monsoon intruding inland and the overall control by the westerly. This study reconstructs the Holocene climate/humidity variation using dimensionality reduction and integrated analysis based on the multiarchive records published in the study area, and synthesizes the Holocene aeolian sand activity history by sorting out the chronological distribution of the regional aeolian sedimentary stratigraphy. The coupling relationship between regional aeolian activity and humidity change is also examined. The results show that the early Middle Holocene (12–6 ka) in this area was arid, with considerable aeolian activity; the humidity gradually increased and the aeolian activity gradually weakened from the Middle to the Late Holocene. According to the comparative analysis on the regional and hemispheric scales, it is concluded that the environmental evolution process in the GGD is mainly controlled by the westerly circulation.

Key words: Holocene; humidity change; aeolian activities; genetic mechanism; Gurbantonggut Desert